

УДК 535.36+536.24+544.77

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139418

Экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц в хладагент R141b на процесс кипения в свободном объеме

О. Я. Хлиева, Т. В. Лукьянова, Ю. В. Семенюк, В. П. Железный,
А. Г. Никулин

Наведено результати експериментального дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння у вільному об'ємі холодоагенту R141b, розчину R141b/поверхнево-активна речовина Span-80 і нанофлюїду R141b/Span-80/наночастинки TiO_2 на поверхнях з нержавкої сталі й тефлону.

Виміри відривного діаметра бульбашок, частоти відриву бульбашок та густини центрів зародкоутворення проведено при атмосферному тиску в діапазоні густини теплового потоку від 3,0 до 7,5 $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$.

Дослідження показали, що відривний діаметр бульбашок при кипінні нанофлюїду на поверхні нержавкої сталі становить 0,7 мм, на тефлоновій поверхні – 0,45 мм. При цьому добавки наночастинок до розчину R141b/Span-80 призводять до зменшення відривного діаметра бульбашок на тефлоновій поверхні. На поверхні нержавкої сталі спостерігався протилежний ефект.

Показано, що добавки наночастинок TiO_2 до розчину R141b/Span-80 у 2-8 разів зменшують кількість активних центрів зародкоутворення. Цей ефект залежить від густини теплового потоку та типу поверхні кипіння.

Виявлено, що при кипінні R141b і R141b/Span-80 зі збільшенням густини теплового потоку зростає різниця між значеннями густини активних центрів зародкоутворення на тефлоновій поверхні й на поверхні нержавкої сталі.

При густині теплового потоку 7,5 $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ кількість активних центрів зародкоутворення на тефлоновій поверхні нижча у 2 рази, ніж на поверхні нержавкої сталі. При кипінні нанофлюїду в дослідженому діапазоні густини теплового потоку тип поверхні не позначається на кількості активних центрів зародкоутворення і частоті відриву бульбашок.

За результатами дослідження встановлено, що частота відриву бульбашок при кипінні холодоагенту R141b і розчину R141b/Span-80 на тефлоновій поверхні у 1,5-2 рази нижча, ніж на поверхні нержавкої сталі.

Отримані експериментальні дані можуть бути використані для прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при кипінні розчину R141b/Span-80 і нанофлюїду R141b/Span-80/ TiO_2 .

Ключові слова: нанофлюїд, відривний діаметр, частота відриву бульбашки, густина центрів зародкоутворення

1. Введение

В последнее время влияние наночастиц на характеристики теплообмена как при вынужденной конвекции рабочих жидкостей и теплоносителей [1–5], так и при фазовых переходах [6–19], привлекает пристальное внимание иссле-

дователей. Что касается переноса теплоты при фазовых превращениях, добавки наночастиц к базовой жидкости обычно оказывают сильное влияние на процесс зародышеобразования при кипении в свободном объеме. Однако существует несколько как количественных, так и качественных проблем при интерпретации результатов исследования влияния наночастиц на интенсивность теплообмена. Сообщалось обо всех возможных видах эффектов из-за присутствия наночастиц: увеличение коэффициента теплоотдачи (КТО) [1, 2, 4, 5, 6–9, 19]; отсутствие эффекта для КТО [3, 10–12]; снижение КТО [5, 13–19].

Пузырьковое кипение является наиболее сложным процессом теплоотдачи, и в литературе были предложены исключительно эмпирические корреляции или корреляции, основанные на механизме процесса кипения [20, 21]. Эти корреляции полезны при расчетах теплообменных характеристик в инженерных системах, однако из-за ограниченного диапазона применимости редко могут быть достоверными в новых ситуациях [21].

Многочисленные исследования показали невозможность оценить КТО нанофлюидов при кипении в свободном объеме с использованием традиционных моделей. Механические модели (Mechanistic models), построенные на основных принципах, могут облегчить эту проблему [21]. Корреляции, основанные на механизме процесса кипения (Mechanism-Based Correlations), являются в наибольшей степени физически разумными моделями для прогнозирования характеристик процесса пузырькового кипения. Такие модели учитывают внутренние характеристики процесса кипения – отрывной диаметр пузырьков пара, частоту отрыва пузырьков пара и плотность центров зародышеобразования.

Следует отметить, что некоторые модели, которые широко используются на практике, несмотря на то, что учитывают внутренние характеристики процесса кипения, нельзя отнести к корреляциям, основанным строго на механизме кипения. К таким моделям можно отнести модель Стефана и Абдельсалама [22] (которая учитывает только отрывной диаметр пузырька), модель Толубинского [23] (которая учитывает произведение отрывного диаметра пузырька и частоты его отрыва). Истинными механическими корреляциями являются модели Mikic и Rohsenow [24], Benjamin и Balakrishnan [25], модель RPI [26], учитывающие отрывной диаметр пузырька, частоту его отрыва и плотность активных центров зародышеобразования. Широкое использование приведенных моделей на практике ограничивается отсутствием достоверной информации о внутренних характеристиках процесса кипения. Попытки же разработать корреляции или модели для прогнозирования этих характеристик, имели ограниченный успех.

Что касается работ, посвященных влиянию наночастиц на внутренние характеристики процесса кипения, то их количество весьма ограничено [19, 26–29].

Таким образом, процесс пузырькового кипения в свободном объеме должен характеризоваться несколькими параметрами – отрывным диаметром пузырьков, частотой отрыва пузырьков и плотностью центров зародышеобразования [23, 30].

Недостатком многих работ по исследованию кипения нанофлюидов является то, что внутренние характеристики процесса детально не изучались, не все-

гда приводится информация о стабильности нанофлюидов, из-за чего анализ и обобщение результатов затруднителен.

Исходя из вышеизложенного, для развития физически обоснованных моделей прогнозирования КТО при кипении нанофлюидов актуальны новые данные о влиянии наночастиц на внутренние характеристики процесса кипения.

При этом важным является изучение стабильности нанофлюидов и влияния характеристик поверхности нагрева (в частности, смачиваемости) на интенсивность кипения.

Данная информация необходима для оценки перспектив использования нанофлюидов в качестве рабочих тел холодильных машин с целью повышения их энергетической эффективности.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Экспериментальные данные многих исследований кипения нанофлюидов обобщены в обзорах [31, 32].

Наиболее подробные исследования внутренних характеристик кипения для нанофлюидов вода/алмаз (0,01 об. %) и вода/ SiO_2 (0,1 об. %) были представлены в работе [26]. Определено влияние наночастиц на диаметр и частоту отрыва пузырька и плотность центров зародышеобразования. Кроме того, авторы использовали полученные экспериментальные данные о внутренних характеристиках кипения непосредственно для подстановки в модель RPI (Rensselaer Polytechnic Institute) [26, 33]. В результате было получено превосходное качественное и хорошее количественное согласие экспериментальных и расчетных кривых кипения чистой воды [33] и нанофлюидов [26].

В работе [34] авторы экспериментально исследовали теплообмен при пузырьковом кипении в свободном объеме нанофлюидов вода/ TiO_2 и вода/ CuO (0,001; 0,01 и 0,2 мас.%). Проведенная визуализация показала, что добавки наночастиц к базовой жидкости увеличивают количество центров зародышеобразования и уменьшают отрывной диаметр пузырьков. Авторы работы [35] экспериментально исследовали влияние смачиваемости на КТО при кипении в свободном объеме для нанофлюидов, содержащих умеренно гидрофильные и сильно гидрофильные наночастицы диоксида кремния. Было показано, что умеренно гидрофильные наночастицы могут адсорбироваться на границах пузырьков, и, следовательно, это приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырьков. С другой стороны, для сильно гидрофильных наночастиц уменьшение диаметра пузырька не наблюдалось.

Работа [36] посвящена исследованию влияния добавок наночастиц CuO (0,1 0,2 и 0,5 % масс.) в хладагент R113 на характеристики процесса его кипения внутри гладкой трубки. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) в данном исследовании не использовались, при этом не уделено должного внимания устойчивости полученного нанофлюида. Было зафиксировано увеличение КТО, максимальное повышение КТО составило 29,7 % относительно КТО для чистого хладагента.

В дальнейших исследованиях эти же авторы [8] определяли КТО при кипении в свободном объеме нанофлюида R113/наночастицы Cu /ПАВ. Нанофлю-

иды были приготовлены с использованием различных по своей природе ПАВ (анионного, катионного и неионогенного). Концентрация наночастиц составляла от 0 до 1,0 % масс. КТО определялся как в чистом хладагенте, так и в хладагенте с добавками наночастиц при атмосферном давлении, различных значениях плотности теплового потока и концентрации ПАВ. В работе [8] показано, что наличие всех рассмотренных ПАВ при оптимальной концентрации способствует увеличению КТО при кипении по сравнению с этой же величиной для чистого R113. При этом увеличение концентрации всех типов ПАВ в нанофлюиде приводит вначале к интенсификации процесса теплоотдачи при кипении, но при больших концентрациях ПАВ величина КТО начинает снижаться.

Из анализа работы [8] можно сделать вывод, что на увеличение КТО при кипении оказывает влияние как добавка ПАВ, так и присутствие наночастиц, и вклад этих двух добавок к базовому веществу не является аддитивным. Недостатком работы является тот факт, что никак не оценивалась устойчивость образцов и размер наночастиц, поскольку использование разных ПАВ должно влиять на дисперсный состав и устойчивость нанофлюидов.

В работе [18] исследовалась интенсивность теплоотдачи при кипении в свободном объеме нанофлюида R141b/TiO₂ (без ПАВ) при различных значениях плотности теплового потока и нескольких значениях избыточного давления. Концентрация наночастиц в хладагенте составляла 0,01; 0,03 и 0,05 % об. Показано, что с увеличением концентрации наночастиц КТО снижался, причем при больших значениях плотности теплового потока этот эффект был существеннее.

В работе [37] авторы исследовали коэффициент теплоотдачи при кипении нанохладагента R141b/TiO₂/катионное ПАВ внутри трубы. Концентрация наночастиц составляла 0,01 и 0,03 % об., концентрация ПАВ не была указана. Показано увеличение коэффициента теплоотдачи, пропорциональное концентрации наночастиц.

В работе [38] экспериментально исследовался процесс кипения в свободном объеме нанофлюида R134a/наночастицы Al₂O₃. Концентрация наночастиц изменялась от 0,01 до 0,5 % об. Показано, что коэффициент теплоотдачи в присутствии наночастиц значительно возрастает (почти в два раза при концентрации 0,25 % об.), но при дальнейшем росте концентрации наночастиц величина КТО начинает снижаться. Полученный эффект объясняется как увеличением теплопроводности нанофлюида по сравнению с базовой жидкостью, так и снижением его поверхностного натяжения, что приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырьков и увеличению числа рабочих центров парообразования. В то же время, авторы работы [38] объясняют снижение КТО при увеличении концентрации наночастиц активным оседанием частиц на греющей поверхности и ее изоляцией, что приводит к снижению степени перегрева и снижению КТО.

В работе [39] представлено экспериментальное исследование коэффициента теплоотдачи при кипении в свободном объеме на слабооребрённой U-образной трубке, погруженной в нанофлюид TiO₂/R141b.

Было обнаружено, что интенсивность теплоотдачи нанофлюидов с содержанием частиц 0,0001, 0,001 и 0,01 об. % уменьшалась примерно на 10, 20 и 50 %, соответственно, по сравнению с чистым хладагентом R141b. Этот результат объясняется образованием наносорбционного слоя TiO_2 на поверхности U-образной трубки. После ультразвуковой обработки поверхности коэффициент теплоотдачи нанофлюида с концентрацией наночастиц 0,0001 об. % был примерно на 30 % выше, чем у чистого хладагента R141b.

В работе [40] экспериментально исследовался коэффициент теплоотдачи при кипении раствора R141b/ПАВ SDBS и нанофлюида Cu/R141b/ПАВ SDBS (концентрации наночастиц 0,008, 0,015 и 0,05 об. %). Показано, что для нанофлюида коэффициент теплоотдачи (по сравнению с этой величиной для чистого хладагента) увеличивается пропорционально концентрации наночастиц. Причем для растворов хладагент/ПАВ и для нанофлюидов с такой же концентрацией ПАВ отличия в КТО незначительны. Кроме того, в работе [40] получен интересный результат: КТО при кипении чистого R141b на поверхности, изначально покрытой осевшими наночастицами, выше, чем при кипении нанофлюида на чистой поверхности.

Таким образом, как видно из рассмотренных работ, влияние добавок наночастиц на внутренние характеристики процесса кипения и на КТО не является однозначным. Требуются дальнейшие исследования, в которых особое внимание следует уделить обеспечению стабильности нанофлюидов и влиянию характеристик поверхности нагрева на интенсивность кипения.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является оценка влияния добавок наночастиц TiO_2 на внутренние характеристики процесса кипения хладагента R141b на поверхностях нагревателей из нержавеющей стали и тефлона при плотностях теплового потока, характерных для испарителей холодильных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- создать экспериментальную установку для изучения внутренних характеристик (отрывного диаметра и частоты появления пузырьков) процессов кипения в свободном объеме чистых жидкостей, растворов и нанофлюидов;
- изучить влияние добавок поверхностно-активного вещества Span-80 на стабильность коллоидной системы R141b/Span-80/наночастицы TiO_2 ;
- изучить влияние добавок поверхностно-активного вещества Span-80 и наночастиц TiO_2 на внутренние характеристики процессов кипения хладагента R141b в свободном объеме;
- проанализировать экспериментально оцененные внутренние характеристики процесса кипения хладагента R141b, раствора R141b/ Span-80 и нанофлюида R141b/Span-80/ TiO_2 при различных плотностях теплового потока на поверхностях нагревателей из нержавеющей стали и тефлона.

4. Материалы и методы, использованные в исследовании процесса кипения R141b, раствора R141b/Span-80 и нанофлюида R141b/Span-80/TiO₂

4. 1. Объекты исследования и их приготовление

Базовой жидкостью для приготовления нанофлюида являлся хладагент R141b, CAS № 1717-00-6 (изготовленный Zhejiang MR Refrigerant Co. Ltd, Китай). В качестве добавок использовались наночастицы TiO₂. Согласно информации производителя, размер наночастиц в порошке не превышал 25 нм, CAS № 1317-70-0 (Sigma-Aldrich).

Материал наночастиц (TiO₂) был выбран ввиду его химической стабильности, хорошо развитой технологии производства и низкой стоимости. Хладагент R141b был выбран в качестве базового вещества по нескольким причинам. Во-первых, этот хладагент является жидким при температуре окружающей среды и атмосферном давлении, поэтому он удобен для приготовления нанофлюида и для изучения его процессов кипения. Во-вторых, хладагент R141b относится к той же группе галогенопроизводных углеводородов, что и широко используемые хладагенты – R134a, R410A и другие. Поэтому результаты, полученные на кипящих образцах модельной системы R141b/наночастицы, могут быть распространены на гидрофторуглеродные хладагенты, которые широко используются в химической и холодильной промышленности, а также в системах кондиционирования воздуха.

В данном исследовании не удалось получить коллоидную стабильную систему R141b/наночастицы TiO₂ без использования поверхностно-активных веществ, что отмечается также в работе [41]. Этот факт противоречит информации, приведенной в [18], где авторы сообщают об устойчивости нанофлюида R141b/наночастицы TiO₂ без использования каких-либо поверхностно-активных веществ.

Таким образом, в настоящей работе и в [41] было установлено, что система R141b/наночастицы TiO₂ остается стабильной только в присутствии поверхностно-активного вещества. Тип и концентрация поверхностно-активного вещества – Span-80, обеспечивающие наилучшую коллоидную стабильность, были определены в специально проведенных, например, в [41].

Следует учитывать, что не только наночастицы, но и добавки поверхностно-активных веществ, приводят к изменению теплофизических свойств базовой жидкости и внутренних характеристик процесса кипения [8, 42]. Поэтому объектами исследования в этой работе являлись:

- хладагент R141b без добавок наночастиц и ПАВ – **R141b**;
- раствор хладагента R141b и поверхностно-активного вещества Span-80 (0,1 мас. %) – **R141b/Surf**;
- нанофлюид, состоящий из хладагента R141b, поверхностно-активного вещества Span-80 (0,1 мас. %) и наночастиц TiO₂ (0,1 мас. %) – **R141b/Surf./TiO₂**.

Для приготовления нанофлюида применялся двухступенчатый метод, который состоял из следующих этапов:

- ультразвуковая обработка смеси наночастиц, ПАВ и хладагента;
- механическое диспергирование;

– повторная ультразвуковая обработка.

Ультразвуковая обработка производилась в ванне Codison CD 4800 при частоте 42 кГц и мощности 0,07 кВт в течение 30 минут. Механическое диспергирование производилось в шаровой мельнице, заполненной шариками ZrO_2 с диаметром 2 мм, в течение 12 часов.

Фотографии образцов в герметичных оптических ячейках с длиной оптического пути 4,05 мм представлены на рис. 1.

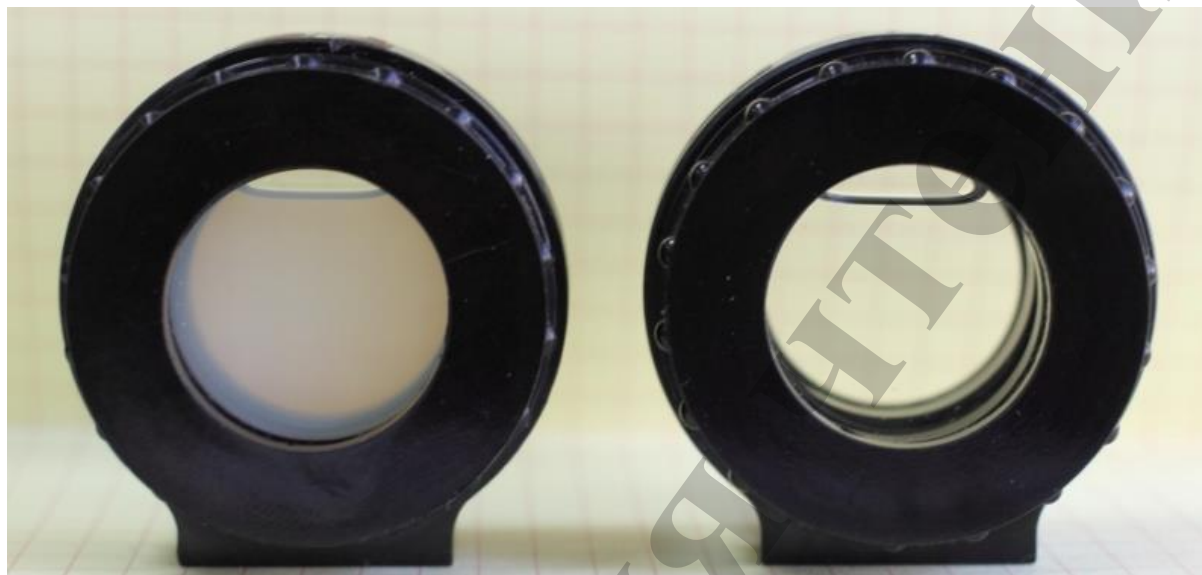


Рис. 1. Снимок образцов нанофлюида R141b/Surf./TiO₂ (99,80/0,10/0,10 мас. %) и чистого R141b в герметичных оптических ячейках через 1 час после приготовления

Устойчивость нанофлюида во времени проверялась путем измерения среднего размера наночастиц спектральным турбидиметрическим методом. Практическая реализация этого метода заключалась в измерении оптической плотности образца нанофлюида в оптической ячейке в зависимости от длины волны проходящего света (диапазон длин волн $\lambda=500-700$ нм). С этой целью был использован спектрофотометр Shimadzu UV-120-02. Предварительные исследования, приведенные в [41], показали хорошую коллоидную стабильность нанофлюида в течение 3-х месяцев.

4. 2. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки для исследования процесса кипения представлена на рис. 2.

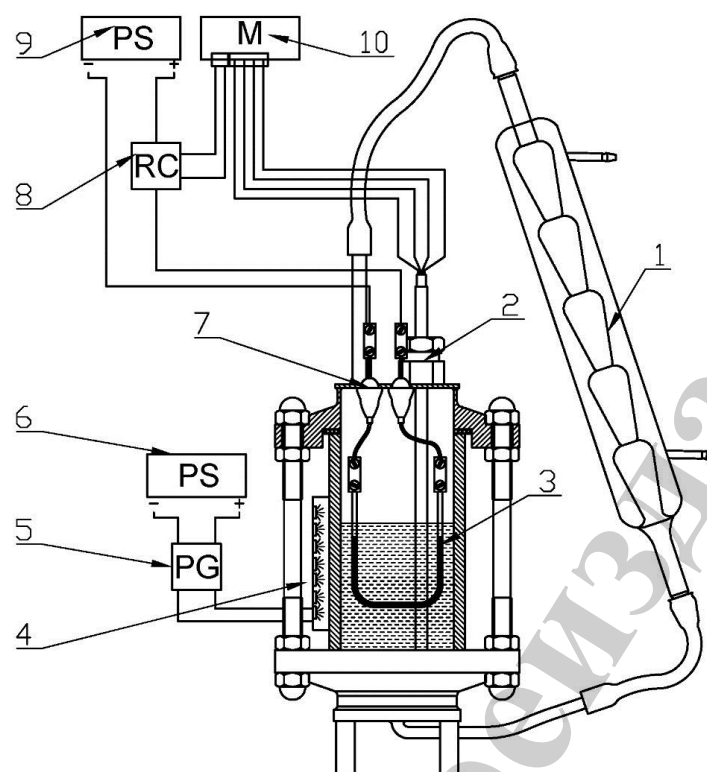


Рис. 2. Экспериментальная установка для изучения внутренних характеристик процесса кипения в свободном объеме: 1 – конденсатор; 2 – термометр сопротивления; 3 –нагреватель; 4 – источник света для создания стробоскопического эффекта; 5 – генератор импульсов; 6, 9 – источники электропитания; 7 – герметичный электрический разъем; 8 – катушка сопротивления; 10 – мультиметр

Кипение исследуемых объектов происходило на нагревателе 3, помещенном в оптическую ячейку. Изображение оптической ячейки представлено на рис. 3.

На первом этапе исследования использовался тонкостенный капилляр из нержавеющей стали диаметром 2,00 мм. На втором – тот же капилляр, покрытый тонким слоем тефлона, диаметром 2,05 мм. Для подачи электрической энергии на нагреватель использовался стабилизированный источник питания BVP Electronics Power 30V 50A. Неопределенность измерения мощности, подаваемой на нагреватель, составляла 0,01 Вт.

Температура кипящей жидкости измерялась платиновым термометром сопротивления 2. Сопротивление термометра измерялось компенсационным методом цифровым мультиметром 10 (Rigol 3064) с использованием образцовой катушки сопротивления 8 класса точности 0,01. Расширенная неопределенность измерения температуры не превышала 0,05 К.

Фотосъемка процесса кипения производилась камерой Canon EOS 1100D при освещении измерительной ячейки стробоскопом. Следует отметить, что использование стробоскопического эффекта позволяет получать цифровые изображения быстрых процессов с высоким разрешением, которое намного

превышает качество снимков, полученных высокоскоростными камерами низкого ценового уровня. Недостатком же этого метода является наложение изображений восходящих пузырьков друг на друга.

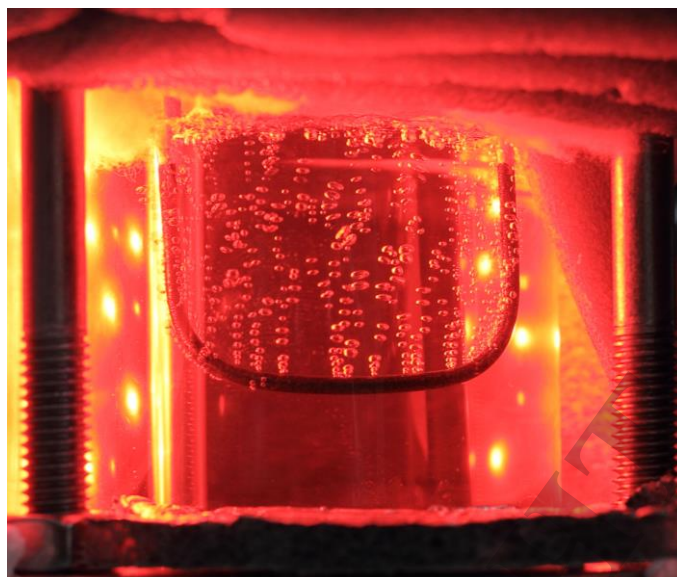
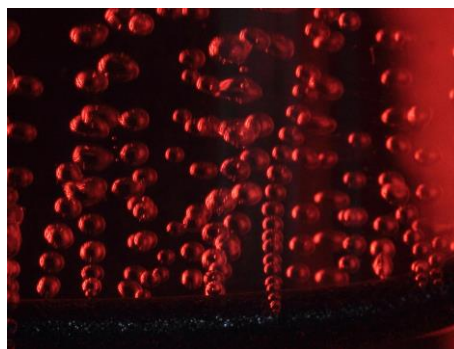


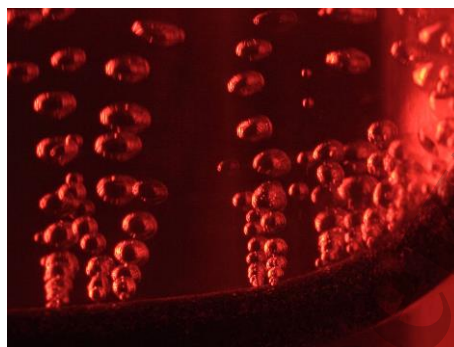
Рис. 3. Снимок экспериментальной ячейки для изучения внутренних характеристик процесса кипения в свободном объеме при атмосферном давлении

Источником света в стробоскопе был набор из 10-ти светодиодов (1 Вт) с максимальной длиной волны 650 нм. Камера и источник света стробоскопа располагались под углом 90 °. Оптическая ячейка, в которой проводился процесс кипения, во время экспериментов изолировалась от других источников света. Длительность светового излучения составляла 0,3 мс, а интервалы между вспышками составляли 2,4–5,0 мс.

В качестве примера на рис. 4 представлены изображения исследованных объектов, кипящих на тефлоновой поверхности при атмосферном давлении и при плотности теплового потока $6,60 \pm 0,03 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.



a



б



в

Рис. 4. Изображения исследованных объектов, кипящих на тефлоновой поверхности при атмосферном давлении и при плотности теплового потока $6,60 \pm 0,03 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$: *a* – R141b; *б* – R141b/Surf.; *в* – R141b/Surf./TiO₂

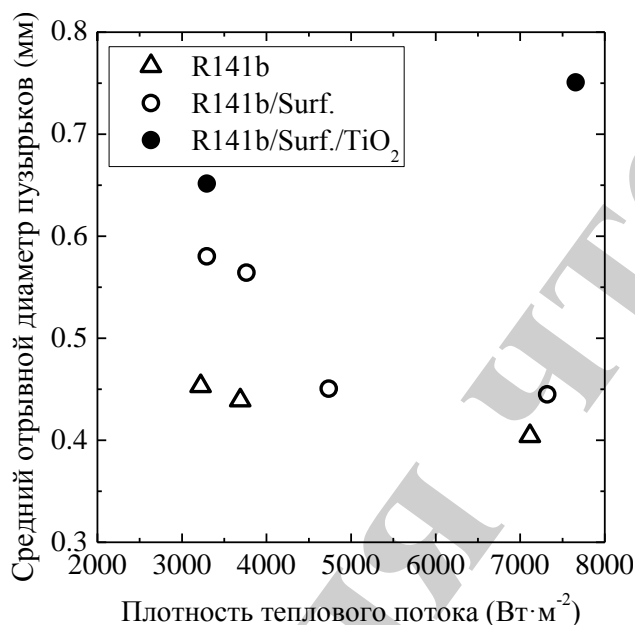
Использование стробоскопического эффекта при фиксации изображения на матрице камеры позволило оценить частоту отрыва пузырьков пара при обработке графических объектов. Эти данные были получены путем обработки снимков кипящей жидкости с использованием AutoCAD. Средний отрывной диаметр пузырьков и средняя частота отрыва пузырьков рассчитывались при анализе 100–160 пузырьков.

5. Результаты исследования процесса кипения R141b, раствора R141b/Span-80 и нанофлюида R141b/Span-80/TiO₂

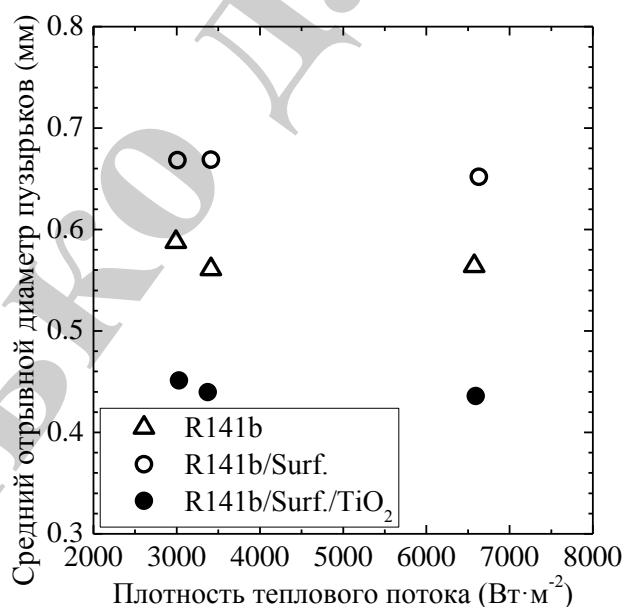
Внутренние характеристики кипения (отрывной диаметр пузырьков, частота отрыва пузырьков и плотность центров зародышеобразования) были экс-

периментально исследованы при атмосферном давлении в диапазоне плотности теплового потока от 3,0 до 7,5 кВт·м⁻². Такой интервал плотностей теплового потока характерен для испарителей холодильных систем [43].

Полученные зависимости величин среднего отрывного диаметра пузырьков, средней частоты отрыва пузырьков и плотности центров зародышеобразования от плотности теплового потока при давлении $P=0,1013$ МПа для объектов исследования показаны на рис. 5–7.

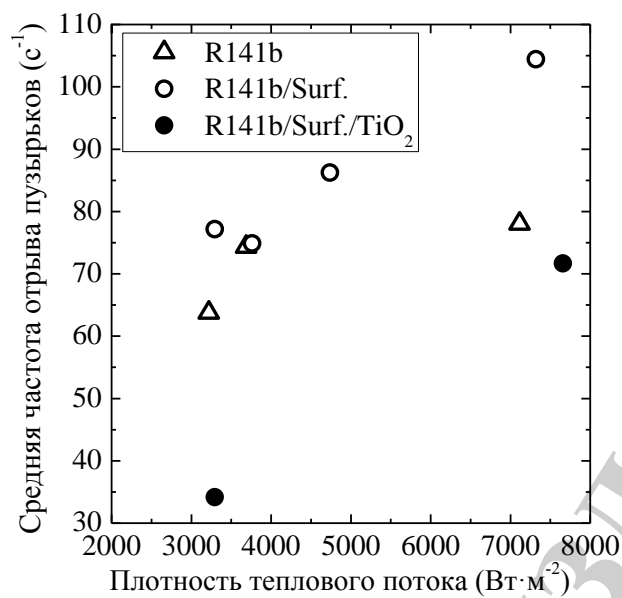


a

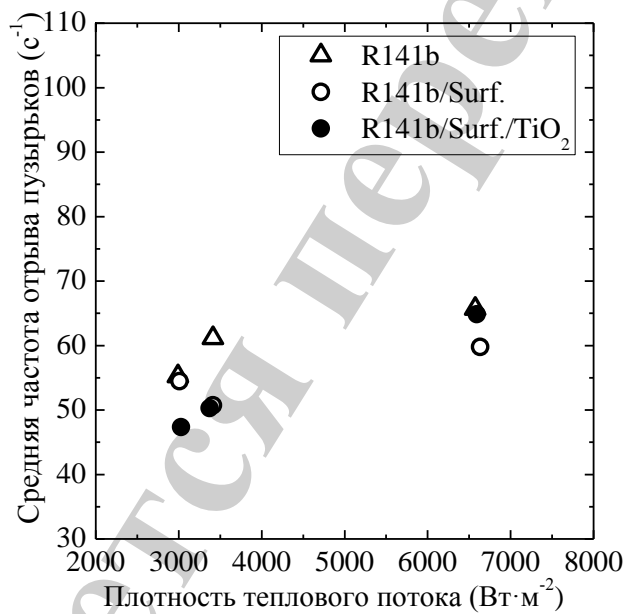


б

Рис. 5. Зависимость среднего отрывного диаметра пузырьков от плотности теплового потока при кипении чистого R141b, R141b/Surf. и R141b/Surf./TiO₂: *a* – на поверхности из нержавеющей стали; *б* – на тефлоновой поверхности

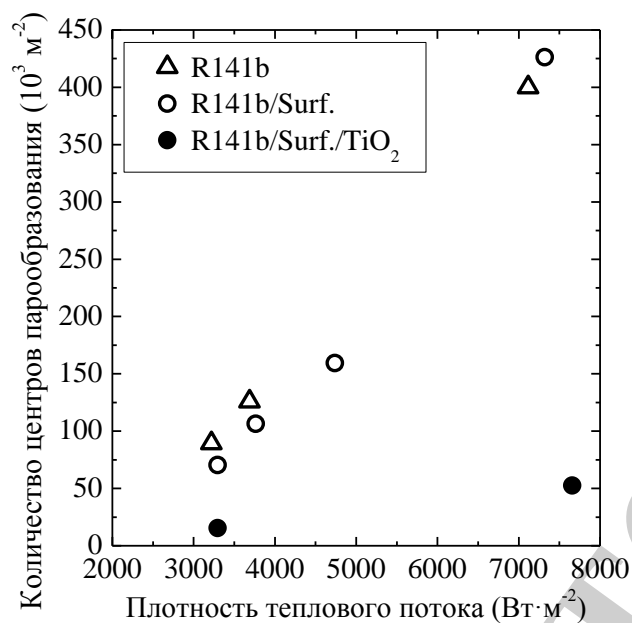


a

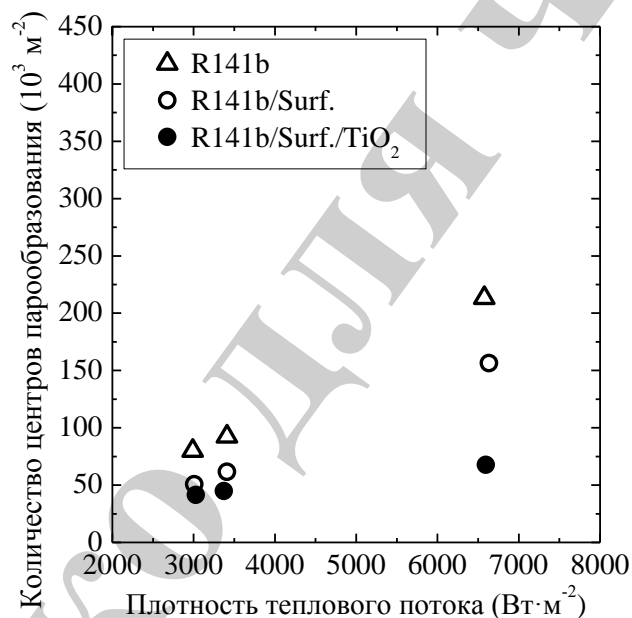


б

Рис. 6. Зависимость средней частоты отрыва пузырьков от плотности теплового потока при кипении чистого R141b, R141b/Surf. и R141b/Surf./TiO₂:
a – на поверхности из нержавеющей стали; *б* – на тефлоновой поверхности



a



б

Рис. 7. Зависимость плотности центров зародышеобразования от плотности теплового потока при кипении чистого R141b, R141b/Surf. и R141b/Surf./TiO₂: *a* – на поверхности из нержавеющей стали; *б* – на тефлоновой поверхности

Как видно из приведенной на рис. 5–7 информации, даже небольшие добавки ПАВ и наночастиц приводят к значительному изменению внутренних характеристик кипения хладагента R141b. Смачиваемость поверхности нагрева также существенно сказывается на интенсивности кипения.

6. Обсуждение результатов исследования процесса кипения R141b, раствора R141b/Span-80 и нанофлюида R141b/Span-80/TiO₂

В качестве достоинства проведенного исследования следует отметить, что оно включало важный этап – получение стабильного нанофлюида. Данное обстоятельство обеспечивает надежность и адекватность полученной информации.

Как следует из полученных результатов, количество центров зародышеобразования при кипении R141b и раствора R141b/Surf. на тефлоновой поверхности значительно ниже, чем на поверхности нержавеющей стали. Наиболее вероятной причиной этого являются отличия в шероховатости поверхностей.

В то же время количество центров зародышеобразования при кипении нанофлюида как на нержавеющей стали, так и на тефлоне, соизмеримо. При этом добавки наночастиц в 2–8 раз уменьшают количество центров зародышеобразования по сравнению с раствором R141b/Surf. Вероятно, уменьшение числа активных центров зародышеобразования при кипении нанофлюидов происходит из-за того, что небольшие полости заполняются наночастицами [31].

Следует отметить также, что наибольшая частота отрыва пузырьков наблюдается при кипении чистого R141b и раствора R141b/Surf. на поверхности из нержавеющей стали.

Получен интересный результат, отражающий влияние добавок наночастиц на отрывной диаметр пузырьков. Отрывной диаметр пузырьков при кипении нанофлюида на поверхности нержавеющей стали больше, чем при кипении чистого R141b. Напротив, при кипении нанофлюида на тефлоновой поверхности эта величина значительно ниже, чем для чистого R141b.

Как показано в работе [19], информация о внутренних характеристиках процесса кипения позволяет получить адекватную корреляцию для расчета КТО чистых веществ и нанофлюидов на основе модели RPI [26]. Поэтому полученные экспериментальные данные могут быть использованы для развития физически обоснованных моделей прогнозирования КТО при кипении нанофлюидов. Однако для решения этой задачи требуется проведение более широкого исследования. Так, для повышения степени адекватности расчетных моделей необходима информация о теплофизических свойствах нанофлюидов, в первую очередь плотности, поверхностного натяжения и вязкости.

Указанные недостатки могут быть устранены путем проведения дополнительных исследований в широком диапазоне давлений на установке, описанной в работе [19]. Также планируется проведение измерений теплофизических свойств рассмотренных здесь объектов исследования.

7. Выводы

1. Созданная экспериментальная установка позволяет исследовать внутренние характеристики процесса кипения в свободном объеме чистых жидкостей, растворов и нанофлюидов при атмосферном давлении и плотности теплового потока до $7,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. С использованием стробоскопического эффекта возможно получать данные об отрывном диаметре пузырьков, частоте отрыва пузырьков и плотности центров их зародышеобразования.

Расширенные неопределенности результатов измерений не превышают: для температуры – 0,05 К; для мощности, подаваемой на нагреватель, – 0,01 Вт.

2. Установлено, что система R141b/наночастицы TiO_2 остается стабильной только в присутствии поверхностно-активного вещества. В качестве ПАВ рекомендуется использовать вещество Span-80 при его концентрации в растворе, равной 0,1 мас. %.

3. Проведено экспериментальное исследование процессов кипения в свободном объеме хладагента R141b, раствора R141b/ Span-80 и нанофлюида R141b/Span-80/ TiO_2 при плотностях теплового потока от 3,0 до 7,5 кВт·м⁻². Полученная экспериментальная информация позволяет оценить влияние добавок поверхностно-активного вещества Span-80 и наночастиц TiO_2 на внутренние характеристики процессов кипения хладагента R141b в свободном объеме.

4. В результате проведенного анализа полученных экспериментальных данных установлены особенности влияния добавок ПАВ и наночастиц, а также типа поверхности нагрева на внутренние характеристики процесса кипения хладагента R141b в свободном объеме.

Добавление ПАВ в хладагент R141b приводит к увеличению отрывного диаметра пузырьков и частоты их отрыва, но незначительно сказывается на количестве центров зародышеобразования.

Добавки наночастиц TiO_2 в раствор R141b/Span-80 в 2-8 раз уменьшают количество активных центров зародышеобразования. Этот эффект зависит от плотности теплового потока и типа поверхности кипения.

Исследования показали, что отрывной диаметр пузырьков при кипении нанофлюида на поверхности нержавеющей стали составляет 0,7 мм, на тефлоновой поверхности – 0,45 мм. При этом добавки наночастиц в раствор R141b/Span-80 приводят к уменьшению отрывного диаметра пузырьков на тефлоновой поверхности. На поверхности нержавеющей стали наблюдался противоположный эффект.

Выявлено, что при кипении R141b и R141b/Span-80 с увеличением плотности теплового потока возрастает разность между значениями плотности активных центров зародышеобразования на тефлоновой поверхности и на поверхности нержавеющей стали. При плотности теплового потока 7,5 кВт·м⁻² количество активных центров зародышеобразования на тефлоновой поверхности в 2 раза ниже, чем на поверхности нержавеющей стали. При кипении нанофлюида в исследованном диапазоне плотности теплового потока тип поверхности не сказывается на количестве активных центров зародышеобразования и частоте отрыва пузырьков.

По результатам исследования установлено, что частота отрыва пузырьков при кипении хладагента R141b и раствора R141b/Span-80 на тефлоновой поверхности в 1,5-2 раза ниже, чем на поверхности нержавеющей стали.

Литература

1. Ali H. M., Arshad W. Effect of channel angle of pin-fin heat sink on heat transfer performance using water based graphene nanoplatelets nanofluids // Interna-

tional Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 106. P. 465–472. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.061>

2. Arshad W., Ali H. M. Graphene nanoplatelets nanofluids thermal and hydrodynamic performance on integral fin heat sink // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 107. P. 995–1001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.127>

3. Arshad W., Ali H. M. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a straight minichannel heat sink using TiO₂ nanofluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 110. P. 248–256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.032>

4. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel / Minakov A. V., Lobasov A. S., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Rudyak V. Y. // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 88. P. 140–148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.041>

5. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel / Minakov A. V., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Rudyak V. Y. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 102. P. 745–755. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.071>

6. Heat Transfer Intensification Using Nanofluids / Ding Y., Chen H., Wang L., Yang C.-Y., He Y., Yang W. et. al. // KONA Powder and Particle Journal. 2007. Vol. 25. P. 23–38. doi: <https://doi.org/10.14356/kona.2007006>

7. Liu D.-W., Yang C.-Y. Effect of Nano-Particles on Pool Boiling Heat Transfer of Refrigerant 141b // ASME 5th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. 2007. doi: <https://doi.org/10.1115/icnmm2007-30221>

8. Peng H., Ding G., Hu H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid // Experimental Thermal and Fluid Science. 2011. Vol. 35, Issue 6. P. 960–970. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.01.016>

9. Experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer enhancement of TiO₂-water based nanofluids / Ali H. M., Generous M. M., Ahmad F., Irfan M. // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 113. P. 1146–1151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.127>

10. You S. M., Kim J. H., Kim K. H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 83, Issue 16. P. 3374–3376. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1619206>

11. Vassallo P., Kumar R., D'Amico S. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47, Issue 2. P. 407–411. doi: [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(03\)00361-2](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(03)00361-2)

12. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids / Kwark S. M., Kumar R., Moreno G., Yoo J., You S. M. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, Issue 5-6. P. 972–981. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.018>

13. Das S. K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46, Issue 5. P. 851–862. doi: [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(02\)00348-4](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(02)00348-4)
14. Das S. K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2003. Vol. 29, Issue 8. P. 1237–1247. doi: [https://doi.org/10.1016/s0301-9322\(03\)00105-8](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(03)00105-8)
15. Bang I. C., Heung Chang S. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃–water nano-fluids from a plain surface in a pool // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48, Issue 12. P. 2407–2419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047>
16. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux / Kim S. J., Bang I. C., Buongiorno J., Hu L. W. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, Issue 19-20. P. 4105–4116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002>
17. Liu Z., Liao L. Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51, Issue 9-10. P. 2593–2602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.050>
18. Trisaksri V., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂–R141b nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52, Issue 5-6. P. 1582–1588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.07.041>
19. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/Al₂O₃ nanofluid / Nikulin A., Khliyeva O., Lukianov N., Zhelezny V., Semenyuk Y. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 118. P. 746–757. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.008>
20. Handbook of heat transfer / W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho (Eds.). McGraw-Hill New York, 1998. 1501 p.
21. Dhir V. K. Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer–Achievable or a Hopeless Task? // *Journal of Heat Transfer*. 2006. Vol. 128, Issue 1. P. 1. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2136366>
22. Stephan K., Abdelsalam M. Heat-transfer correlations for natural convection boiling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1980. Vol. 23, Issue 1. P. 73–87. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90140-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90140-4)
23. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. Киев: Наукова думка, 1980. 316 с.
24. Mikic B. B., Rohsenow W. M. A New Correlation of Pool-Boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics // *Journal of Heat Transfer*. 1969. Vol. 91, Issue 2. P. 245. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3580136>
25. Benjamin R. J., Balakrishnan A. R. Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1996. Vol. 39, Issue 12. P. 2495–2504. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00320-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00320-7)

26. Infrared thermometry study of nanofluid pool boiling phenomena / Gerardi C., Buongiorno J., Hu L., McKrell T. // *Nanoscale Research Letters*. 2011. Vol. 6, Issue 1. P. 232. doi: <https://doi.org/10.1186/1556-276x-6-232>
27. Hamda M., Hamed M. S. Bubble dynamics in pool boiling of nanofluids // 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 2016. P. 30–33.
28. Shoghl S. N., Bahrami M., Moraveji M. K. Experimental investigation and CFD modeling of the dynamics of bubbles in nanofluid pool boiling // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 58. P. 12–24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.027>
29. Single bubble dynamics on a superhydrophilic surface with artificial nucleation sites / Nam Y., Aktinol E., Dhir V. K., Ju Y. S. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 54, Issue 7-8. P. 1572–1577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.031>
30. Pioro I. L., Rohsenow W., Doerffer S. S. Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, Issue 23. P. 5033–5044. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.019>
31. Ciloglu D., Bolukbasi A. A comprehensive review on pool boiling of nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 84. P. 45–63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.063>
32. Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: A comprehensive review / Fang X., Chen Y., Zhang H., Chen W., Dong A., Wang R. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. P. 924–940. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.047>
33. Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video / Gerardi C., Buongiorno J., Hu L., McKrell T. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, Issue 19-20. P. 4185–4192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.041>
34. The effect of nanoparticle type and nanoparticle mass fraction on heat transfer enhancement in pool boiling / Karimzadehkhoei M., Shojaeian M., Şendur K., Mengüç M. P., Koşar A. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 109. P. 157–166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.116>
35. Quan X., Wang D., Cheng P. An experimental investigation on wettability effects of nanoparticles in pool boiling of a nanofluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. P. 32–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.098>
36. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube / Peng H., Ding G., Jiang W., Hu H., Gao Y. // *International Journal of Refrigeration*. 2009. Vol. 32, Issue 6. P. 1259–1270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.01.025>
37. Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer to TiO₂/R141b Nanorefrigerant / Tazarv S., Saffar-Avval M., Khalvati F., Mirzaee E., Mansoori Z. // *Experimental Heat Transfer*. 2015. Vol. 29, Issue 2. P. 188–204. doi: <https://doi.org/10.1080/08916152.2014.973976>

38. An experimental investigation of the effect of the addition of nano Aluminum oxide on pool boiling of refrigerant 134A / Eid E. I., Khalaf-Allah R. A., Taher S. H., Al-Nagdy A. A. // Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 53, Issue 8. P. 2597–2607. doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2010-y>
39. Chang T.-B., Wang Z.-L. Experimental investigation into effects of ultrasonic vibration on pool boiling heat transfer performance of horizontal low-finned U-tube in TiO₂/R141b nanofluid // Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 52, Issue 11. P. 2381–2390. doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1746-5>
40. Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure / Diao Y. H., Li C. Z., Zhao Y. H., Liu Y., Wang S. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 89. P. 110–115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.043>
41. An experimental study of heat transfer coefficient and internal characteristics of nucleate pool boiling of nanofluid R141b/TiO₂ / Khliyeva O. et. al. // 1st European Symposium on Nanofluids (ESNf2017). 2017. P. 162–165.
42. Cheng L., Mewes D., Luke A. Boiling phenomena with surfactants and polymeric additives: A state-of-the-art review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50, Issue 13-14. P. 2744–2771. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.016>
43. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004.